

Braunschweigische
Wissenschaftliche Gesellschaft

Jahrbuch 2017

Sonderdruck
Seiten 106–120



J. CRAMER Verlag • Braunschweig
2018

Chury unmagnetisch – Und was nun?*

KARL-HEINZ GLAßMEIER

Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, TU Braunschweig,
Mendelssohnstraße 3, DE-38106 Braunschweig
E-Mail: kh.glassmeier@tu-braunschweig.de

und

Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen

Am 2. März 2004 wurde vom Raumflughafen der European Space Agency (ESA) in Kourou aus, an Bord einer Ariane 5 Trägerrakete, die Raumsonde Rosetta mit ihrem Landegerät Philae auf den Weg zum Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko gestartet (Glassmeier et al. 2007a). An Bord der beiden Raumfahrzeuge befanden sich auch zwei an der Technischen Universität Braunschweig konzipierte, entwickelte und gebaute Magnetometer (Auster et al. 2007; Glassmeier et al. 2007b). Wissenschaftliches Ziel der Rosetta-Mission war die Erforschung der Struktur und Dynamik eines Kometenkerns und seiner Wechselwirkung mit dem interplanetaren Medium.

Nach eine zehnjährigen Reise erreichte Rosetta im August 2014 ihr Ziel. Spektakuläre Bilder des Kometenkerns, aufgenommen mit der am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen mit Beiträgen aus dem Institut für Datenverarbeitung der TU Braunschweig entwickelten OSIRIS-Kamera (Keller et al. 2009), erregten weltweite Aufmerksamkeit. Die enten- oder löwenförmige Gestalt (Abb. 1) lässt darauf schließen, dass der Nukleus dieses Kometen durch die langsame Anlagerung zweier Objekte entstanden ist.

Kometenkerne sind bizarre Gebilde. Sie bestehen wesentlich aus Staub und Eis in einem Verhältnis von etwa 5 zu 1 (Pätzold et al. 2016). Oberflächenstrukturen bisher nicht bekannter Form konnte die OSIRIS-Kamera aufnehmen. Die etwa 900 Meter „hohe“ Hathor-Klippe (Abb. 2) sei hier nur als ein Beispiel genannt. Wegen der geringen Masse des Nukleus, 10^{13} kg (Masse der Erde $6 \cdot 10^{24}$ kg) im Falle Chury (Pätzold et al. 2016), ist auch das Gravitationsfeld sehr klein. Die Gravitationsbeschleunigung an der Oberfläche beträgt nur etwa ein Zehn-

* Der Vortrag wurde am 24.11.2017 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

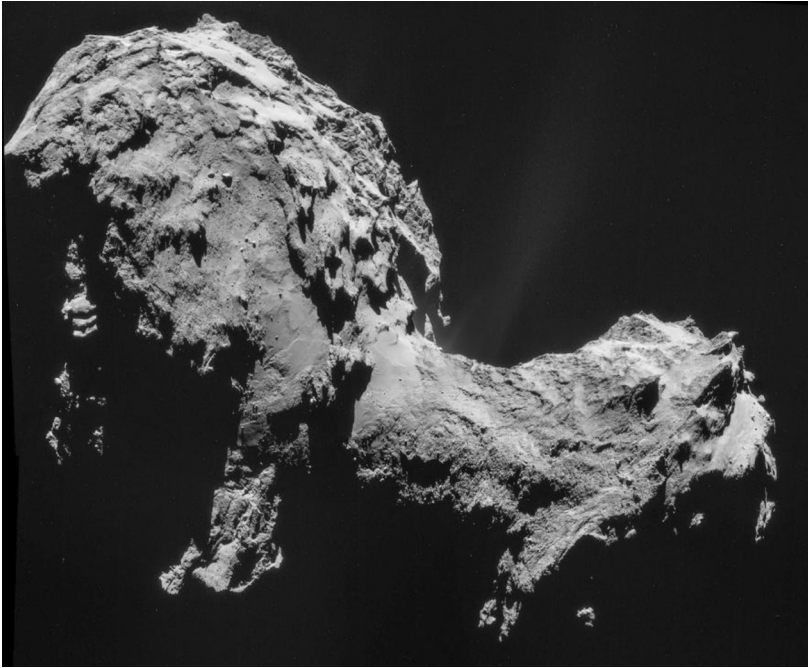


Abb 1: Mosaikaufnahme des Nukleus von 67P/Churyumov-Gerasimenko am 19. September 2014 (Quelle: ESA/Rosetta/NAVCAM).

tausendstel der Schwerebeschleunigung der Erde. „Springt“ man daher von der „Oberkante“ der Hathor-Wand, dann dauert es etwa eine Stunde bis man „unten“ ankommt, ungefähr die Zeitspanne, die zum Lesen dieses Beitrages erforderlich ist.

Auch die braunschweigischen Magnetfeldmessungen zeigten gleich nach Ankunft am Kometen völlig unerwartete Signale. Die Wechselwirkung zwischen einem ausgasenden Kometenkern und dem Sonnenwind ist durch sogenannte Massenbeladung des Sonnenwindplasmas geprägt. Die Ionisation kometaryer Gasteilchen und der Einbau dieser neugeborenen Ionen in den strömenden Sonnenwind erzeugt Plasmawellen mit Frequenzen bei der lokalen Gyrationfrequenz der Ionen, so die Erfahrungen aus Messungen am Kometen 1P/Halley (Neubauer et al. 1986; Glassmeier et al. 1989; Glassmeier 1995). Chury überraschte aber mit Wellen bei Frequenzen von 40-50 mHz, Frequenzen deutlich von der lokalen Gyrationfrequenz verschieden. Diese Wellenaktivität wurde zwischen August 2014 und März 2015 beobachtet, verschwand dann wieder, um im Februar 2016 wieder aufzutreten. Wegen der Regelmäßigkeit dieser Plasmaschwingungen hat sich

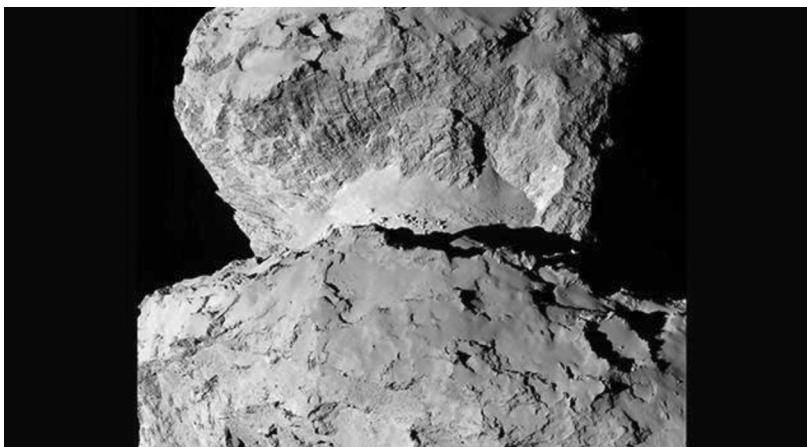


Abb 2: OSIRIS-Aufnahme der Hathor-Klippe des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko am 7. August 2014 aus einer Distanz von 104 km (Quelle: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA).

für dieses Phänomen die Bezeichnung „Das Singen des Kometen“ eingebürgert. Abb. 3 zeigt als Beispiel die Messsignale am 5. September 2014 (Richter et al. 2015). Eine von dem Braunschweiger Künstler Manuel Senfft erstellte Sonifikation der Messsignale findet sich auf den Webseiten der ESA und dem Musikportal Soundcloud (<http://blogs.esa.int/rosetta/2014/11/11/the-singing-comet/> und <https://soundcloud.com/esa/a-singing-comet>).

Die Ursache dieses Singens ist mittlerweile weitgehend geklärt. Es handelt sich hier um sogenannte Cross-Field-Current- oder modifizierte Weibel-Instabilitäten im massenbeladenen Plasma der nukleusnahen Wechselwirkungsregion (Meier et al. 2016; Glassmeier 2017). Dieses Singen spielt für die weiteren Betrachtungen der Bestimmung und Interpretation der magnetischen Eigenschaften des Nukleus eine bedeutsame Rolle, denn die beobachteten Plasmawellen wurden auch vom Magnetometer des Landegerätes Philae gemessen.

Philae wurde am 12. November 2014 vom Mutterschiff Rosetta getrennt und trat eine 17 km lange Reise bis zur Oberfläche des Nukleus von Chury an. Leider verlief die Landung nicht wie ursprünglich geplant. Philae sollte an dem ausgewählten Landeplatz verbleiben und dort die wissenschaftlichen Messungen durchführen wie sie Jahre vorher auf der Erde geplant worden waren. Wegen technischer Defekte der Harpune, mit der Philae auf dem Nukleus verankert werden sollte (Taylor et al. 2014; Bibring et al. 2009), und sogenannter Andruckdüsen prallte der Lander von der Oberfläche zurück, flog entlang einer etwa 200 m hohen Parabelbahn über die Kometenoberfläche, hatte Kontakt mit einer Klippe, lan-

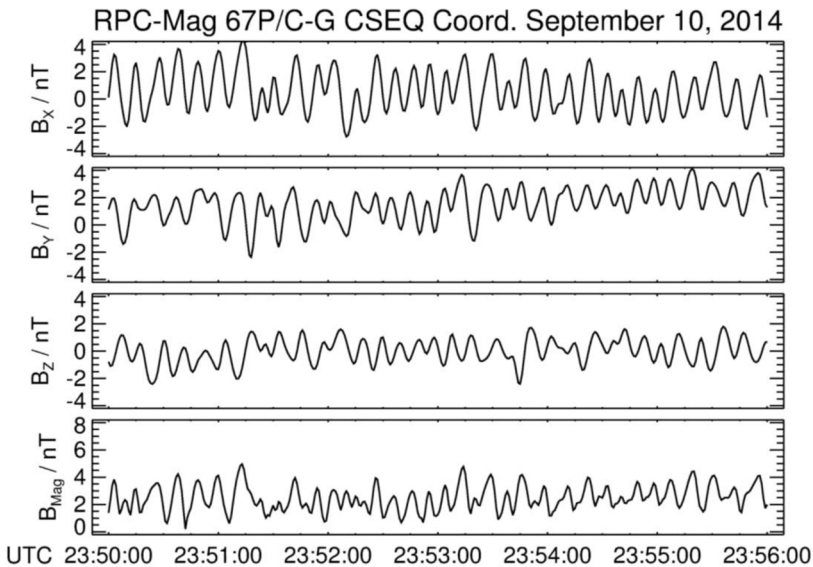


Abb 3: Magnetfeldvariationen, gemessen mit dem Rosettamagnetometer am 10. September 2014 zwischen 23:50 und 23:56 UTC. Die Komponenten des Magnetfeldes sind im Comet-Centered-Solar-Ecliptic Koordinatensystem (CSEQ) dargestellt. Der Ursprung dieses Systems liegt im Schwerpunkt des Nukleus, die x-Achse weist positiv zur Sonne, die z-Achse steht senkrecht dazu in Richtung der Normalen zur Ekliptik und die y-Achse komplettiert das Rechte-Hand-System. Die Messdaten sind ungefiltert und zeigen das Singen des Kometen bei einer Frequenz um 40 mHz (nach Glassmeier, 2017).

dete dann ein zweites Mal, prallte wieder ab, um dann nach kurzem Flug eine endgültige Ruheposition einzunehmen. Erst im Juni 2016, kurz vor Beendigung der Rosetta-Mission, gelang es, mit der Kamera OSIRIS ein Bild Philaes an der Oberfläche des Nukleus zu machen.

Aufgabe des Magnetometermesssystems des Landers war es, die magnetischen Eigenschaften des Nukleus an der Landestelle zu vermessen. Magnetfelder planetarer Körper haben ihre Ursachen in Dynamoprozessen im Inneren des Körpers oder sind Folge einer remanenten Magnetisierung des planetaren Materials. Ein Dynamoprozess erfordert einen hinreichend großen Körper, der im Inneren flüssig ist und dessen Material eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzt (siehe z.B. Glaßmeier 2005). Solch ein Dynamoprozess als Ursache für ein eventuell vorhandenes globales kometares Magnetfeld kann ausgeschlossen werden, denn der Nukleus eines Kometen ist zu klein, im Inneren nicht aufgeschmolzen, und es kann auch nicht davon ausgegangen werden, dass die elektrische Leitfähigkeit des Nukleusmaterials nennenswert groß ist.

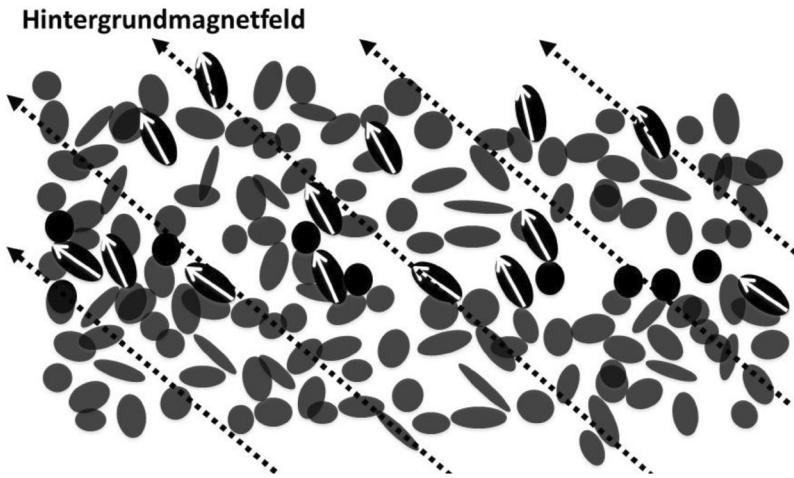


Abb 4: Schematische Darstellung der Ausrichtung magnetisierter Staubteilchen (schwarz mit weißem, die Magnetisierungsrichtung angebendem Pfeil) in einem Hintergrundmagnetfeld (gestrichelte Pfeile). Die grauen Partikel sind silikatischer Natur (nach Fu und Weiss, 2012).

Eine remanente Magnetisierung eines kleinen planetaren Körpers kann nach heutiger Kenntnis durch zwei Prozesse entstehen. Zum einen ist vorstellbar, dass sich magnetisierte Staubteilchen unter dem Einfluss ihrer wechselseitigen magnetischen Kräfte so anlagern, dass sie im Laufe der Zeit größere magnetisierte Körper bilden. Diese sogenannte Accretional Attractive Remanent Magnetization (AARM) wurde erstmals von Nübold und Glaßmeier (2000) genauer anhand von theoretisch-numerischen Experimenten und im Labor untersucht. Dabei zeigte sich aber, dass sich nicht nur magnetisierte Teilchen zu anderen magnetisierten Teilchen gesellen, sondern auch silikatische Teilchen dem Verbund beitreten. Auf die Masse bezogen kann so keine starke Magnetisierung erreicht werden.

Fu & Weiss (2007) haben daher einen anderen Mechanismus vorgeschlagen: Accretional Detrital Remanent Magnetization (ADRM). Das ADRM-Modell ähnelt dem Prozess, durch den in terrestrischen Sedimenten eine remanente Magnetisierung entstehen kann (siehe z.B. Soffel 1991). In einem umgebenden Magnetfeld richten sich magnetisierte Körper längs des Feldes aus. Findet keine Ausrichtung statt, dann können sich die Magnetfelder entgegengesetzt orientierter magnetischer Dipole aufheben. Sedimentieren diese Teilchen aber in einem starken Hintergrundfeld, so ergibt sich eine resultierende Magnetisierung, die dann die Richtung des umgebenden Hintergrundfeldes aufweist (Abb. 4).

Diesem Ausrichtungsprozess stehen aber andere Prozesse entgegen. So wirken die gasdynamische Turbulenz in der proto-planetaren Scheibe und thermisch be-

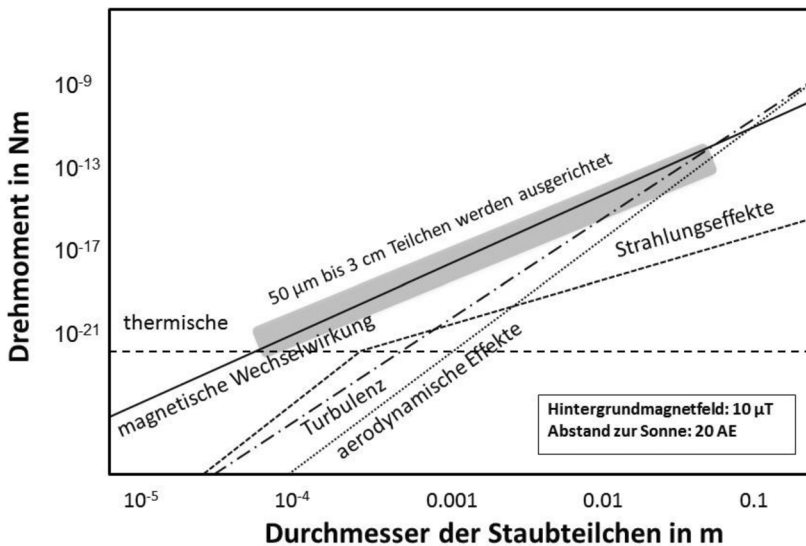


Abb 5: Auf Staubteilchen wirkende, ausrichtende Drehmomente wie thermisch bedingte Stöße, Strahlungseffekte, Turbulenz, aerodynamische Ausrichtung nicht-sphärischer Teilchen und magnetische Ausrichtung. Bei einem angenommenen Magnetfeld der Stärke 10 μT (der Erdmagnetfeld in Braunschweig hat eine Stärke von etwa 50 μT) überwiegen die magnetischen, ausrichtenden Drehmomente im Größenbereich 50 μm – 3 cm (nach Fu und Weiss, 2012).

dingte Stöße zwischen den Teilchen diesem Ausrichtungsprozess entgegen. Auch aerodynamische Effekte sind zu berücksichtigen, falls die Teilchen nicht sphärisch sind. Und Strahlungseffekte behindern die Ausrichtung ebenfalls. Es kommt also darauf an, wie stark die magnetischen Drehmomente, die die Teilchen ausrichten, im Vergleich zu anderen Drehmomenten sind. Fu & Weiss (2012) haben für den ADRM-Prozess eine sehr genaue Analyse der verschiedenen Einflussfaktoren durchgeführt (Abb. 5). Falls das umgebende Magnetfeld von ausreichender Größe ist, dann sollte für magnetisierte Staubteilchen der Größe 50 μm bis 3 cm eine Ausrichtung und damit eine signifikante remanente Magnetisierung kometaren Materials möglich sein. Der ADRM-Prozess ist nicht nur interessant, weil er eine Magnetisierung des Materials erklären, sondern auch weil er als eine Art Messgerät für die Stärke des Magnetfeldes im solaren Nebel dienen kann.

Falls das Material, aus dem Chury aufgebaut ist, magnetisiert ist, dann kann das resultierende Magnetfeld in guter erster Näherung als Dipolfeld beschrieben werden. Bei Annäherung an die Oberfläche sollte dann eine mit abnehmendem Abstand signifikante Zunahme des Feldes beobachtet werden. Eine solche Zunahme wurde nicht beobachtet. Abb. 6 zeigt die Magnetfeldmessungen, die vom Magnetmeter

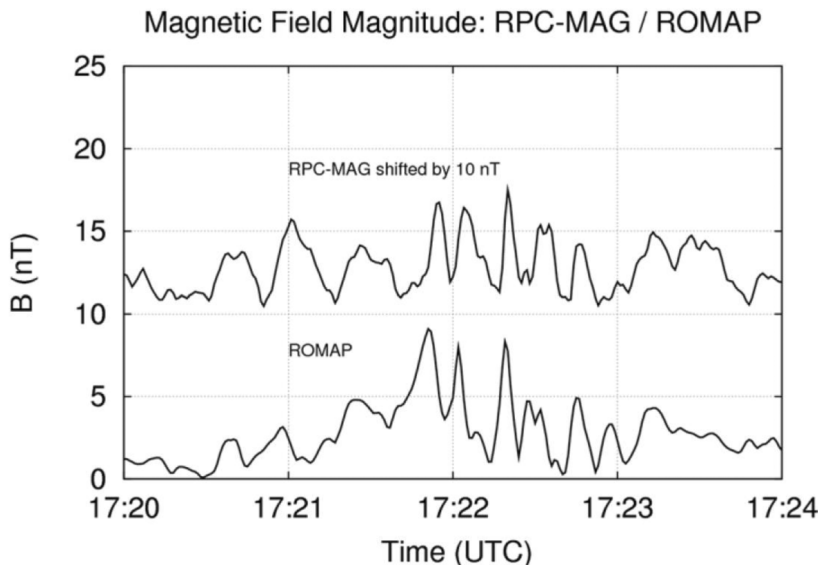


Abb 6: Zeitliche Variation der Magnitude des Magnetfeldes kurz vor der zweiten Landung an der Oberfläche Chury's und an Bord Rosettas. Die Variationen sind hochkorreliert und lassen darauf schließen, dass nahe und an der Oberfläche lediglich das durch das Singen geprägte interplanetare Magnetfeld zu beobachten ist (nach Auster u.a., 2015).

an Bord Philae's nahe der Oberfläche des Nukleus gemacht wurden. Es ist keine wesentliche Änderung des Feldes zwischen Philae's und am Mutterschiff Rosetta in etwa 20 km Abstand zu erkennen. Daraus kann eindeutig geschlossen werden, dass das Material des Nukleus keine nennenswerte Magnetisierung besitzt. Die durch das Lander magnetometer aufgezeichneten Variationen des Magnetfeldes sind nahezu identisch mit denen, die an Bord Rosettas beobachtet wurden. Das Singen des Kometen ist demnach ein über weite Raumbereiche in der Wechselwirkungsregion bis hinunter zur Oberfläche zu beobachtendes Phänomen.

Aus der Lage Philae's und weiteren detaillierten Betrachtungen lässt sich eine Magnetisierung des Nukleusmaterials von $< 6 \cdot 10^{-7} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ab ableiten. Zum Vergleich: Die Magnetisierung eines Stabmagnetens liegt bei etwa $5 \cdot 10^1 \text{ Am}^2/\text{kg}$. Mondgestein besitzt eine Magnetisierung von $10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ und SNC-Meteoriten, als deren Mutterkörper der Planet Mars angesehen wird, weisen einen Wert von $5 \cdot 10^{-4} \text{ Am}^2/\text{kg}$ auf. Man darf also schlussfolgern, dass der Nukleus des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko ein im Großen unmagnetisierter Körper ist (Auster et al. 2015). Dies schließt die Existenz magnetisierter Stäube allerdings nicht aus, deutet lediglich darauf hin, dass auf Skalen größer als 5 cm, dem minimalen Abstand zwischen dem Magnetometersensor auf Philae zur Oberfläche, keine

geordneten magnetisierten Strukturen vorliegen. Falls magnetisierte Stäube existieren, dann muss ihre Orientierung chaotisch sein, so dass sich die magnetischen Felder der einzelnen Staubteilchen wechselseitig aufheben.

Die abenteuerliche Flugbahn Philaes konnte hochgenau anhand kinematischer Betrachtungen und der Magnetfeldmessungen des Mutterschiffs Rosetta und ihrer Tochter Philae rekonstruiert werden (Heinisch et al. 2016; Heinisch et al. 2017). Das Singen des Kometen spielt hier wieder eine entscheidende Rolle. Vor der Trennung von Rosetta wurde ein Drallrad an Bord Philaes aufgespannen, um so eine Achsenstabilisierung des Landers während seines Abstiegs zur Oberfläche zu gewährleisten. Beim ersten Oberflächenkontakt sollte dieses Drallrad dann abgeschaltet und der Drehimpuls auf den Nukleus übertragen werden. Die missglückte Landung hatte aber zur Folge, dass das Drallrad zwar abgeschaltet, sein Drehimpuls aber auf den Lander Philae insgesamt übertragen wurde, Philae also in eine nicht geplante Rotation versetzt wurde. Philae rotierte und taumelte daher nach dem ersten Oberflächenkontakt in völlig unbekannter Art und Weise um seine Körperachse.

Nun kann aber das Magnetometer auf Philae vereinfacht als magnetischer Kompass betrachtet werden. Fest montiert im Bezugssystem des Landers rotierte dieser Kompass ebenfalls unbekannt im Raum. Ließe man einen Kompass an der Erdoberfläche entsprechend herumtaumeln, so würde die Bewegung der Kompassnadel Informationen über dieses Taumeln liefern, Information aus der sich dann die Rotationseigenschaften des Körpers rekonstruieren lassen. Da Chury kein globales Magnetfeld besitzt, konnte eine einfache Bestimmung der Rotationseigenschaften nicht durchgeführt werden. Da das Singen des den Nukleus umgebenden Plasmas nahezu identisch am Ort Rosettas und Philaes nahe der Oberfläche war (Abb. 7), konnte durch eine Korrelationsrechnung die Lage des Landers im Raum sehr präzise bestimmt werden. Das Koordinatensystem, in dem die Rosettamessungen durchgeführt wurden, war sehr gut bekannt. Nun galt es, das Koordinatensystem des rotierenden Landers so zu drehen, dass eine hinreichend gute Korrelation zwischen den Magnetfeldkomponenten Rosettas und Philaes erreicht wurde. So entstanden zeitlich hochaufgelöste Drehmatrizen, die es erlaubten, die Lage des Landers sehr genau zu bestimmen. Die Rotationsfrequenz konnte darüber hinaus aus spektralen Betrachtungen der Magnetfeldmessungen auf Philae bestimmt werden.

Chury ist also ein im Großen unmagnetischer Körper. Scheinbar ein enttäuschendes Ergebnis, auch wenn die Magnetfeldmessungen es ermöglichten, die Lage des Landers im Raum während seines Irrfluges über die Kometenoberfläche zu bestimmen. Doch muss man berücksichtigen, dass Chury auch als eine Art magnetischer Sensor betrachtet werden kann, da jede Information über die Magnetisierung Information über die Stärke der Magnetfelder in der proto-planetaren Scheibe zurzeit der Entstehung der Planeten und anderer planetarer Körper liefert.

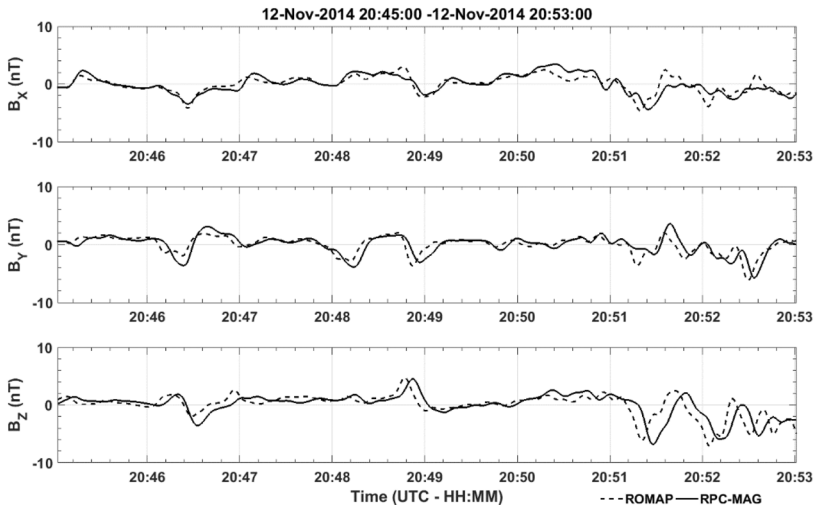


Abb 7: Beispiel für gleichzeitige Messungen des Magnetfeldes im Raum und an der Oberfläche nachdem das Koordinatensystem des Landers bereits an das Rosettas angepasst wurde. Kleine zeitliche Verzögerungen der Maxima und Minima deuten auf Ausbreitungseffekte der Plasmawellen hin, die das Singen verursachen. Aus ihnen lässt sich z.B. die Wellenlänge abschätzen (nach Richter u.a., 2016).

Warum besteht ein so großes Interesse an der Kenntnis dieser Magnetfelder?

Nach heutiger Vorstellung ist unser Sonnensystem durch den gravitativen Kollaps einer interstellaren Gas- und Staubwolke entstanden. Dieser Kollaps hätte eigentlich dazu führen müssen, dass nicht nur der Großteil der Masse in unserer Sonne konzentriert wurde, sondern auch der Drehimpuls überwiegend in der Sonne gespeichert wurde. Dies ist aber nicht der Fall.

Zwar ist der deutlich überwiegende Teil der Masse der ursprünglichen, kollabierten Wolke in der Sonne konzentriert, doch der Drehimpuls wurde von den Planeten aufgenommen. Dieser Beobachtungsbefund bedingt einen Prozess für den radialen Transport von Drehimpuls von innen nach außen.

Drehimpulstransport kann z.B. durch Turbulenz bewerkstelligt werden. Direkt an der Erdoberfläche sind Reibungseffekte für die Korotation des atmosphärischen Gases mit der festen Erde verantwortlich. Diese Korotation setzt sich bis in große Höhen fort. Der dafür erforderliche Drehimpulstransport ist Folge der Scherviskosität des atmosphärischen Gases. Turbulenz, hervorgerufen durch Temperaturunterschiede, erhöht die effektive Viskosität erheblich. So ist in der terrestrischen Atmosphäre ein ausreichender vertikaler Transport des Impulses gewährleistet.

Prinzipiell ist ein solcher Mechanismus auch im solaren Nebel vorstellbar. Doch zeigen Abschätzungen, dass die normale Viskosität in gravitativ kollabierenden Gas- und Staubwolken, sogenannten Akkretionsscheiben, nicht ausreichend ist, um den erforderlichen nach außen gerichteten Drehimpulstransport zu gewährleisten (siehe z.B. Balbus & Hawley 1998). Durch Turbulenz deutlich erhöhte Viskosität ist ein möglicher Prozess, um eine hohe effektive Viskosität zu erzielen. Dies erfordert aber physikalische Prozesse, die wiederum die Turbulenz erzeugen. Ein solcher Prozess ist die Magnetorotationsinstabilität, als deren Ursache die radiale Variation der Geschwindigkeit der Materialien um die entstehende Sonne gilt.

Differentielle Rotation ist Folge der Keplerbewegung der Materialien um die Sonne. Die Umlaufzeit der Erde um die Sonne beträgt ein Jahr. Merkur benötigt für seine Umrundung lediglich 88 Erdtage oder 0,24 Jahre. Jupiter, in einem Abstand zur Sonne zwischen etwa 4 – 6,5 AE (1 astronomische Einheit AE entspricht dem Abstand der Erde zur Sonne) benötigt dagegen bereits 11,86 Jahre. Und Neptun schafft eine Umrundung erst nach 164,8 Jahren. Die dazu korrespondierenden Bahngeschwindigkeiten sind: 47,9 km/s (Merkur), 29,8 km/s (Erde), 13,1 km/s (Jupiter), 5,4 km/s. Die äußeren Planeten bewegen sich deutlich langsamer um die Sonne als die inneren. Dies gilt dann auch näherungsweise für Gase und Stäube.

Differentielle Rotation ist immer mit einer Verscherung des strömenden Mediums verbunden. Und eine solche Verscherung stellt keinen stabilen Zustand dar. Strömt z.B. Luft seicht über eine Wasseroberfläche, dann stellt diese Grenzflächensituation auch eine Situation mit Geschwindigkeitsscherung dar, denn das Wasser ruht, die Luft bewegt aber sich. Als Folge dieser Scherströmungssituation entstehen an der Wasseroberfläche Wellenbewegungen. Diesen Prozess bezeichnet man auch als Kelvin-Helmholtz-Instabilität (Helmholtz 1868). Energie und Impuls, die für die Anregung der Wellen an der Wasseroberfläche erforderlich sind, entstammen der Luftströmung, die dadurch abgebremst wird. Es werden also Impuls und Energie von der Luft auf das Wasser übertragen.

Ähnliches geschieht nun auch in differentiell strömenden Akkretionsscheiben. Die radiale Scherströmung wird instabil und Drehmoment und Drehimpuls werden von innen nach außen transportiert. Um eine ausreichende Kopplung zwischen Gasvolumina zu gewährleisten ist ein Magnetfeld erforderlich. Aufgrund der geringen Dichte sind Reibungskräfte hier nicht ausreichend. Ist aber das Gas zumindest partiell ionisiert, hat es demnach Plasmaeigenschaften, dann spielen Lorentzkräfte $\vec{j} \times \vec{B}$ eine große Rolle. Hier bezeichnet \vec{j} die elektrische Stromdichte und \vec{B} den Magnetfeldvektor. Mit dem Ampèreschen Gesetz $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$ lässt sich die Lorentzkraftdichte umformen zu $\vec{j} \times \vec{B} = \nabla B^2 / (2\mu_0) + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} / \mu_0$. Der erste Term auf der rechten Seite beschreibt den magnetischen Druck, der zweite Term die magnetische Spannung. Es ist dieser Spannungsterm, der das

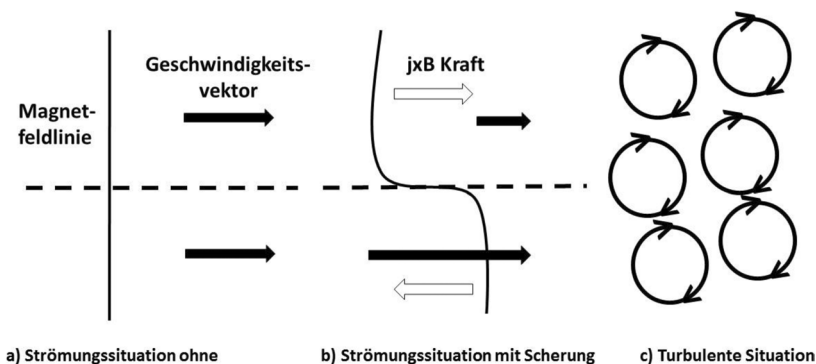


Abb. 8: Schematische Darstellung der Kopplung von Strömungsfeld und Magnetfeld. Bei fehlender Scherung (a) bewegt sich die magnetische Feldlinie mit der Strömung. Tritt Scherung auf (b), dann wird die Feldlinie ebenfalls verschert und magnetische Spannungen wirken, die benachbarte Strömungsregionen verkoppeln. Ist die Scherung über den gesamten Raumbereich verteilt (c), liegt eine Situation mit differentieller Rotation vor, dann kommt es zu starker Turbulenz und Vermischung und Austausch von Drehimpuls.

Magnetfeld zu einer Art von Feder werden lässt. Magnetische Feldlinien versuchen immer, sich zu verkürzen und zu begradigen.

In Plasmen sind die Magnetfelder eng an das ionisierte Gas gekoppelt. Magnetfeldlinien sind gewissermaßen im Plasma eingefroren. Bewegt sich das Gas, dann bewegen sich auch die magnetischen Feldlinien. Verändert sich die Topologie des Magnetfeldes, dann zieht dies entsprechende Bewegungen des Plasmas nach sich. Da wegen der Divergenzfreiheit des magnetischen Feldes, $\nabla \cdot \vec{B} = 0$, Magnetfeldlinien quer zu den verscherten Strömungslinien der Gasbewegung verlaufen können, kann man magnetische Feldlinien sehr anschaulich als magnetische Federn betrachten, die benachbarte Strömungslinien verkoppeln. Über diese magnetischen Federn erfolgt dann der Austausch von Drehimpuls. Innen liegende, schnelle Gasvolumina werden abgebremst, außen liegende werden beschleunigt (Abb.8).

Durch diesen Prozess der Magnetorotationsinstabilität wird eine intensive Kopplung der Volumina in radialer Richtung ermöglicht. Der dann radial nach außen gerichtete Drehimpulstransport macht auch weiteren Massentransport in Akkretionsscheiben nach innen möglich. Aber dieser Prozess benötigt geeignete Magnetfelder. Ist die magnetische Feldstärke zu klein, dann tritt der Prozess nicht auf. Ist die Feldstärke zu groß, dann treten zu große magnetische Spannungen auf und das System wird zu steif. Es kommt zu Behinderungen der Gasbewegung. Auch ist eine ausreichend große elektrische Leitfähigkeit erforderlich, es muss ein ausreichend ionisiertes Gas vorliegen. Dies erfordert aber einen Ionisationsprozess.

Die stellare UV-Strahlung ist hier förderlich, auch hochenergetische Elektronen stehen in Akkretionsscheiben für die Ionisation zur Verfügung.

Allerdings ist über die genauen Bedingungen in der proto-planetaren Scheibe wenig bekannt. Die Vermessung der magnetischen Eigenschaften des Nukleus von 67P/Churyumov-Gerasimenko liefern hier wichtige neue Informationen. Denn ein Vergleich der Messergebnisse mit den theoretischen Modellen und Abschätzungen von Fu & Weiss (2012) lassen auf Magnetfeldstärken deutlich kleiner als $10 \mu\text{T}$ in dem Gebiet und zu der Zeit schließen, in dem und zu der Chury entstanden ist. Philae darf daher als Paläo-Sonde für die Vermessung der Magnetfelder in der proto-planetaren Scheibe betrachtet werden, die geeignete Proxyinformation liefert. Mit Rosetta und Philae kein globales Magnetfeld entdeckt zu haben ist somit ein wichtiges wissenschaftliches Ergebnis.

Natürlich sind weitere Paläo-Sondenmessungen erforderlich. Eine zukünftige Möglichkeit dafür bietet die japanische Hayabusa II-Mission, die im Herbst 2018 den Asteroiden Ryugu erreichen wird, von dessen Oberfläche Staub aufsammeln soll und zur Erde zurückbringen wird. An Bord dieser Raumsonde befindet sich auch ein vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt federführend entwickeltes Landegerät (Ho et al. 2017), der Mobile Asteroid Surface Scout (MASCOT). Unter den vier wissenschaftlichen Messgeräten MASCOTs befindet sich auch ein an der Technischen Universität Braunschweig entwickeltes und betriebenes Magnetometersystem (Hercik et al. 2017). Wieder sollen die magnetischen Eigenschaften eines kleinen Körpers in unserem Sonnensystem genauer untersucht werden. Die Landung von MASCOT auf der Oberfläche von Ryugu soll im Herbst 2018 erfolgen.

Danksagung

Mein Dank für Ihren unermüdlichen Einsatz im Rahmen des Rosetta-Projektes gilt meinen Kollegen und Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, ohne deren Enthusiasmus die Technische Universität Braunschweig nicht so viel Freude an der Rosetta-Mission gehabt hätte: Hans-Ulrich Auster, Jürgen Blum, Dragos Constantinescu, Willi Exner, Dennis Frühauff, Karl-Heinz Fornacon, Kathrin Gebauer, Charlotte Götz, Bastian Gundlach, Daniel Heyner, Philipp Heinisch, David Hercik, Evelyn Liebert, Patrick Meier, Uwe Motschmann, Christian Nabert, Katharina Ostaszewski, Anita Przyklenk, Ingo Richter und Bernd Stoll.

Literaturhinweise.

AUSTER, H.U., I. APATHY, G. BERGHOFER, A. REMIZOV, R. ROLL, K.H. FORNACON, K.H. GLASSMEIER, G. HAERENDEL, I. HEJJA, E. KÜHRT, W. MAGNES, D. MOEHLMANN, U. MOTSCHMANN, I. RICHTER, H. ROSENBAUER, C.T. RUS-

SELL, J. RUSTENBACH, K. SAUER, K. SCHWINGENSCHUH, I. SZEMEREY & R. WAESCH (2007): ROMAP: ROSETTA Magnetometer and Plasma Monitor – Space Sci. Rev. **128**: 221–240.

AUSTER, H.U., I. APATHY, G. BERGHOFFER, K.H. FORNACON, A. REMIZOV, C. CARR, C. GÜTTLER, G. HAERENDEL, P. HEINISCH, D. HERCIK, M. HILCHENBACH, E. KÜHRT, W. MAGNES, U. MOTSCHMANN, I. RICHTER, C.T. RUSSELL, A. PRZYKLENK, K. SCHWINGENSCHUH, H. SIERKS & K.H. GLASSMEIER (2015): The nonmagnetic nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. – Science, 349, doi:10.1126/science.aaa5102.

BALBUS, S.A. & J.F. HAWLEY (1998): Instability, turbulence, and enhanced transport in accretion discs. – Rev. Mod. Phys., **70**: 1–53.

BIBRING, J.P. et al. (2009): ROSETTA LANDER ("PHILAE") Investigations, in: SCHULZ, R., C. ALEXANDER, H. BOEHNHARDT & K.H. GLASSMEIER (Hrsg.), Rosetta – ESA's Mission to the Origin of the Solar System. – Springer-Verlag, New York, S. 589ff.

FU, R. & B.P. WEISS (2012): Detrital remanent magnetization in the solar nebula. – J. Geophys. Res., 117, E02003, doi:10.1029/2011JE003925.

GLASSMEIER, K.H., A.J. COATES, M.H. ACUNA, M.L. GOLDSTEIN, A.D. JOHNSTONE, F.M. NEUBAUER & H. REME (1989): Spectral characteristics of low-frequency plasma turbulence upstream of comet p/Halley – J. Geophys. Res. **94**: 7–48.

GLASSMEIER, K.H. (1995): Kometen im Sonnenwind. – Carolo-Wilhelmina Mitteilungen XXX, Heft I, 13–26.

GLASSMEIER, K.H., H. BOEHNHARDT, D. KOSCHNY, E. KÜHRT & I. RICHTER (2007a): The ROSETTA Mission: Flying towards the Origin of the Solar System, Space – Sci. Rev. **128**: 1–21.

GLASSMEIER, K.H., I. RICHTER, A. DIEDRICH, G. MUSMANN, U. AUSTER, U. MOTSCHMANN, A. BALOGH, C. CARR, E. CUPIDO, A. COATES, M. ROTHER, K. SCHWINGENSCHUH, K. SZEGÖ & B. TSURUTANI (2007b): RPC-MAG: The Fluxgate Magnetometer in the ROSETTA Plasma Consortium. – Space Sci. Rev. **128**: 649–670.

GLASSMEIER, K.H. (2008): BepiColombo – Zur Genese eines Weltraumprojektes. – Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft, Jahrbuch 2008, p. 81–91.

GLASSMEIER, K.H. (2017): Interaction of the solar wind with comets: a Rosetta perspective – Phil. Trans. R. Soc. A, 375, 20160256, doi:10.1098/rsta.2016.0256.

HEINISCH, P., H.U. AUSTER, I. RICHTER, D. HERCIK, E. JURADO, R. GARMIER, C. GÜTTLER & K.H. GLASSMEIER (2016): Attitude reconstruction of ROSETTA's Lander PHILAE using two-point magnetic field observations by ROMAP and RPC-MAG – Acta Astronautica **125**: 174–182.

HEINISCH, P., H.U. AUSTER, D. PLETTEMEIER, W. KOFMAN, A. HERIQUE, C. STATZ, R. HAHNEL, Y. ROGEZ, I. RICHTER, M. HILCHENBACH, E. JURADO, R. GARMIER, T. MARTIN, F. FINKE, C. GÜTTLER & K. H. GLASSMEIER (2017): – *Acta Astronautica*, **140**: 509–516.

HELMHOLTZ, VON H. (1868): Über diskontinuierliche Flüssigkeitsbewegungen – Monatsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **23**: 215–228.

HERCIK, D., H.U. AUSTER, J. BLUM, K.H. FORNACON, M. FUJIMOTO, K. GEBAUER, C. GÜTTLER, O. HILLENMAIER, A. HOERDT, E. LIEBERT, A. MATSUOKA, R. NOMURA, I. RICHTER, B. STOLL, B.P. WEISS & K.H. GLASSMEIER (2017): The MASCOT Magnetometer – *Space Sci. Rev.* **208**: 433–449, doi:10.1007/s11214-016-0236-5.

HO, T.M., V. BATURKIN, C. GRIMM, J.T. GRUNDMANN, C. HOBBIE, E. KSENIK, C. LANGE, K. SASAKI, M. SCHLOTTERER, M. TALAPINA, N. TERMTANASOMBAT, E. WEJMO, L. WITTE, M. WRASMANN, G. WUEBBELS, J. ROESLER, C. ZIACH, R. FINDLAY, J. BIELE, C. KRAUSE, S. ULAMEC, M. LANGE, O. MIERHEIM, R. LICHTENHELDT, M. MAIER, J. REILL, H.-J. SEDLMAYR, P. BOUSQUET, A. BELLION, O. BOMPIS, C. CENAC-MORTHE, M. DELEUZE, S. FREDON, E. JURADO, E. CANALIAS, R. JAUMANN, J.-P. BIBRING, K.H. GLASSMEIER, D. HERCIK, M. GROTT, L. CELOTTI, F. CORDERO, J. HENDRIKSE & T. OKADA (2017): MASCOT – The Mobile Asteroid Surface Scout Onboard the Hayabusa2 Mission – *Space Sci. Rev.* **208**: 339–374, doi:10.1007/s11214-016-0251-6.

KELLER, H.U. et al. (2009): OSIRIS: The Scientific Camera System Onboard Rosetta, in: SCHULZ, R., C. ALEXANDER, H. BOEHNHARDT & K.H. GLASSMEIER (Hrsg.), *Rosetta – ESA's Mission to the Origin of the Solar System*. – Springer-Verlag, New York, S. 315ff, 2009.

MEIER, P., K.H. GLASSMEIER & U. MOTSCHMANN (2016): Modified ion-Weibel instability as a possible source of wave activity at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. – *Ann. Geophys.* **37**: 691–707.

NEUBAUER, F.M., K.H. GLASSMEIER, M. POHL, J. RAEDER, M.H. ACUNA, L.F. BURLAGA, N.F. NESS, G. MUSMANN, F. MARIANI, M.K. WALLIS, E. UNGSTRUP, H.U. SCHMIDT (1986): First results from the GIOTTO magnetometer experiment at comet Halley. – *Nature* **321**: 352–355.

NÜBOLD, H. & K.H. GLASSMEIER (2000): Accretional remanence of magnetized dust in the solar nebula. – *Icarus* **144**: 149–159.

PÄTZOLD, M., T. ANDERT, M. HAHN, S. W. ASMAR, J. P. BARRIOT, M. K. BIRD, B. HÄUSLER, K. PETER, S. TELLMANN, E. GRÜN, P. R. WEISSMAN, H. SIERKS, L. JORDA, R. GASKELL, F. PREUSKER, F. SCHOLTEN (2016): A homogeneous nucleus for comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from its gravity field. – *Nature* **530**: 63–65.

RICHTER, I., C. KOENDERS, H. U. AUSTER, D. FRÜHAUFF, C. GÖTZ, P. HEINISCH, C. PERSCHKE, U. MOTSCHMANN, B. STOLL, K. ALTWEGG, J. BURCH, C. CARR, E.

CUPIDO, A. ERIKSSON, P. HENRI, R. GOLDSTEIN, J.-P. LEBRETON, P. MOKASHI, Z. NEMETH, H. NILSSON, M. RUBIN, K. SZEGÖ, B. T. TSURUTANI, C. VALLAT, M. VOLWERK & K. H. GLASSMEIER (2015): Observation of a new type of low-frequency waves at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. – *Ann. Geophys.* **33**: 1031–1036.

RICHTER, I., H. U. AUSTER, G. BERGHOFER, C. CARR, E. CUPIDO, K. H. FORNAÇON, C. GOETZ, P. HEINISCH, C. KOENDERS, B. STOLL, B. T. TSURUTANI, C. VALLAT, M. VOLWERK & K. H. GLASSMEIER (2016): Two-point observations of low-frequency waves at 67P/Churyumov-Gerasimenko during the descent of PHILAE: comparison of RPCMAG and ROMAP. – *Ann. Geophys.* **34**: 609–622.

SOFFEL, H. CHR. (1991): *Paläomagnetismus und Archäomagnetismus*. – Springer-Verlag, Berlin.